



## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **10204533 A**(43) Date of publication of application: **04.08.98**

(51) Int. Cl.

**C21D 8/12**  
**H01F 1/16**(21) Application number: **09011718**(22) Date of filing: **24.01.97**(71) Applicant: **NIPPON STEEL CORP**(72) Inventor: **SAKAI TATSUHIKO**  
**HAMADA NAOYA**  
**MINAMIDA KATSUHIRO**  
**SUGIYAMA KIMHIKO**  
**SAKAIDA AKIRA****(54) PRODUCT OF GRAIN ORIENTED MAGNETIC  
STEEL SHEET EXCELLENT IN MAGNETIC  
PROPERTY**

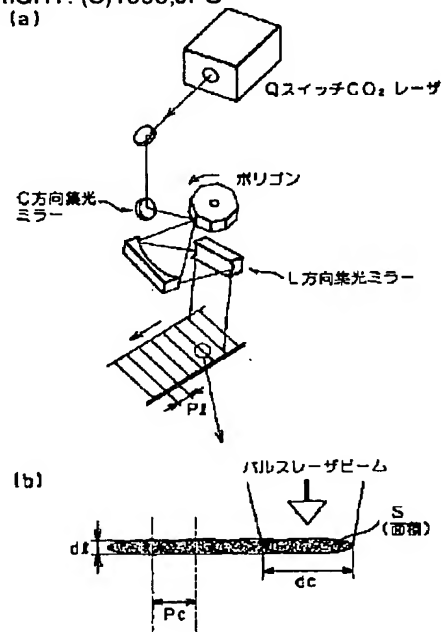
(57) Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide a method for attaining a laser treatment stage suitable for high speed continuous treatment, in which the occurrence of surface laser irradiation marks is prevented and the increase of magnetostriction is minimized, as a method for reducing the iron loss of a grain oriented magnetic steel sheet by laser irradiation.

**SOLUTION:** At the time of irradiating the surface of a grain oriented magnetic steel sheet with a pulsed laser beam, a pulse oscillation Q switch CO<sub>2</sub> laser is used as the laser and the shape of the irradiation beam is an elliptical shape having a major axis in a sheet-width direction and, further, the irradiation power density of a single laser pulse is set at a value not higher than the threshold value of damage of a film on the surface of the steel sheet, by which the occurrence of laser irradiation marks can be prevented. Moreover, the length of major axis of the elliptical beam is set at a value not shorter than the pulsed beam irradiation interval in a sheet-width direction to make continuous pulsed beams synergistic at the surface of the steel sheet, by which

an integrated irradiation energy necessary and sufficient for the improvement of magnetic properties can be provided.

COPYRIGHT: (C)1998,JPO



(51)Int.Cl.<sup>6</sup>

識別記号

F I

C 2 1 D 8/12

C 2 1 D 8/12

D

H 0 1 F 1/16

H 0 1 F 1/16

B

審査請求 未請求 請求項の数4 O L (全 8 頁)

(21)出願番号 特願平9-11718

(22)出願日 平成9年(1997) 1月24日

(71)出願人 000006655

新日本製鐵株式会社

東京都千代田区大手町 2丁目6番3号

(72)発明者 坂井 辰彦

千葉県富津市新富20-1 新日本製鐵株式  
会社技術開発本部内

(72)発明者 浜田 直也

千葉県富津市新富20-1 新日本製鐵株式  
会社技術開発本部内

(72)発明者 南田 勝宏

千葉県富津市新富20-1 新日本製鐵株式  
会社技術開発本部内

(74)代理人 弁理士 石田 敬 (外3名)

最終頁に続く

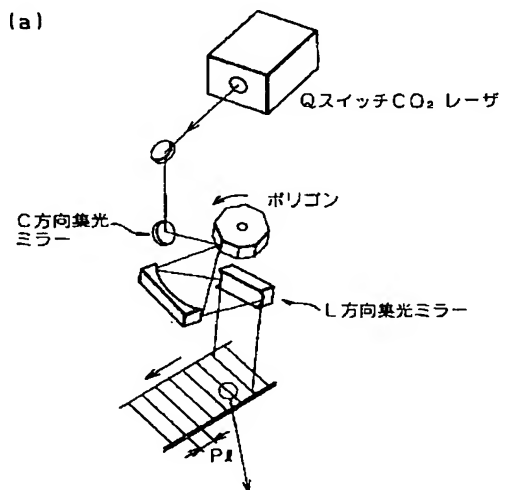
(54)【発明の名称】 磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法

(57)【要約】

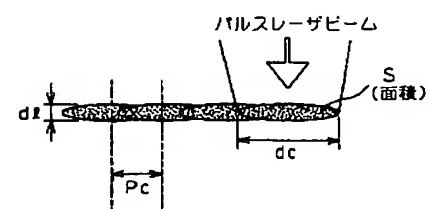
【課題】 レーザ照射により方向性電磁鋼板の鉄損低減方法として、表面レーザ照射痕を抑制し、かつ磁歪の増加を極力抑え、高速・連続処理に適したレーザ処理工程を実現する方法を提供する。

【解決手段】 方向性電磁鋼板の表面にレーザビームを照射するに際し、レーザがパルス発振QスイッチCO<sub>2</sub>レーザであり、照射ビーム形状が板幅方向に長軸を持つ楕円であり、単一レーザパルスの照射パワー密度を鋼板表面の皮膜損傷閾値以下に設定することで、レーザ照射痕の発生を抑制し、かつ楕円ビームの長軸長を板幅方向のパルスビーム照射間隔以上に設定して連続するパルスビームを鋼板表面で重畳させ、磁気特性改善に必要な積算照射エネルギーを与えるレーザ照射方法である。

(a)



(b)



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 方向性電磁鋼板の表面にパルスレーザビームを照射して、磁気特性を改善する方向性電磁鋼板の製造方法において、照射レーザビームの集光形状が板幅方向に長軸を持つ楕円であり、単一レーザパルスの照射パワー密度が鋼板表面の皮膜損傷閾値以下であり、且つ連続するパルスビームの被照射部分が空間的に重畳することを特徴とする磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

【請求項2】 当該パルスレーザにQスイッチCO<sub>2</sub>レーザを用いることを特徴とする請求項1記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

【請求項3】 単一集光パルスのピークパワー密度が12kW/mm<sup>2</sup>以下であることを特徴とする請求項1および2記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

【請求項4】 照射楕円ビームの長軸が0.25～3.5mmであり、短軸が6.0～10.0mmであることを特徴とする請求項1、2および3記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、レーザビームの照射により磁気特性を改善した方向性電磁鋼板に関し、特に鋼板表面にレーザ照射痕を発生させず、且つ、磁気特性を改善する方向性電磁鋼板に係わる。

## 【0002】

【従来の技術】従来、方向性電磁鋼板の製造方法において、鋼板表面に力学的歪みを導入することで磁区を細分化し、鉄損を減少させる方法が種々提案されてきた。中でも特開昭55-18566号公報に開示されるように、鋼板の表面にパルスYAGレーザビームを集光照射して、被照射部での皮膜の蒸発反力により歪みを導入する方法は、鉄損改善効果が大きく、且つ非接触加工であることから信頼性・制御性も高い非常に優れた方向性電磁鋼板の製造法である。

【0003】しかし、パルスレーザを用いる手法では、鋼板表面での皮膜蒸発反力は効果的に得られるという利点はあるものの、表面の絶縁皮膜が破壊されるためレーザ照射痕が発生する。従って、レーザ照射の後に絶縁コーティングを行わなければならないという問題があった。そこで瞬間パワーは比較的低い連続波レーザを用いて皮膜の損傷を抑える方法として、連続波CO<sub>2</sub>レーザを用いる技術が特公昭62-49322号公報に、または連続波YAGレーザを用いる技術が特公平5-32881号公報に開示されている。特に後者の特許においてはその明細書中でQスイッチYAGレーザはパルス時間幅が短く、高ピークパワーを持つため、皮膜の蒸発・照射痕発生は不可避であると明確に記述されている。従って、連続波レーザで照射痕を発生させない手法における歪み導入の源は皮膜蒸発ではなく、鋼板の急加熱・急冷

却にある。

【0004】連続波レーザはパワー密度が低いため照射痕の抑制には効果的であるものの、急加熱・急冷却の能力においても、高ピークパワーのパルスレーザに比べて低いため、歪み導入効率が低い。そこでパルスレーザ法並みの歪みを導入し、同等の鉄損改善を得るには、鋼板へのトータルの照射エネルギーが相対的に増大する。一方、電磁鋼板の磁歪は、トランスに使用した時の騒音に比例する特性であり、鉄損と並び電磁鋼板の重要な品質の一つである。レーザ磁区制御の場合、磁歪はトータルの照射エネルギーに正の相関があることがわかっており、従って、連続波レーザによる磁区制御法ではパルスレーザ法に比べ磁歪が増大するという問題があり、これは照射痕の発生有無に関わらず連続波レーザ法の欠点であった。

【0005】このような背景により、磁気特性の優れた電磁鋼板の製造方法として、パルスレーザ法で問題となるレーザ照射痕が発生せず、且つ、連続波レーザ法で困難である鉄損、磁歪両方の特性向上が可能な手法が望まれていた。

## 【0006】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、方向性電磁鋼板の鉄損を低減させる方法として、従来のパルスレーザ照射による表面レーザ照射痕を抑制し、連続波レーザで問題となる磁歪の増加を極力抑え、且つ高速・連続処理に適したレーザ処理工程を実現する方法を提供することにある。

## 【0007】

【課題を解決するための手段】本発明は、方向性電磁鋼板の表面に、等間隔にレーザビームを照射して、磁気特性を改善する方向性電磁鋼板製造方法において、当該レーザがパルス発振QスイッチCO<sub>2</sub>レーザであり、照射ビーム形状が板幅方向に長軸を持つ楕円であり、レーザパルスの照射パワー密度を鋼板表面の皮膜損傷閾値以下に設定することで、レーザ照射痕の発生を抑制し、且つ楕円ビームの長軸長を板幅方向のパルスビーム照射間隔以上に設定することで、連続するパルスビームを鋼板表面で重畳させ、磁気特性改善に必要な十分な積算照射エネルギーを与えるレーザ照射方法である。

## 【0008】

【発明の実施の形態】レーザ照射による鉄損改善の原理は、照射点を熱源にした歪みにより、磁化容易方向（180°磁区）と直交する磁区（90°磁区）が発生し、ここでの静磁エネルギーを最小化するように180°磁区が細分化され、その結果、磁区幅に比例した鉄損が低下することにある。従って、本発明に係わるレーザ磁区制御法の要点は、表面疵を抑制した上で、且つ効果的に熱歪みを導入することにある。

【0009】図1（a）は本発明によるレーザ磁区制御法の実施形態の一例の模式図であり、（b）は照射部の

拡大図である。鋼板は圧延方向（1方向）に磁化容易方向（180°磁区）が一致した方向性電磁鋼板である。照射されるQスイッチCO<sub>2</sub>レーザパルスビームは直交するl、cの二方向をそれぞれ独立の集光ミラー、あるいはレンズで圧延方向に短軸d<sub>l</sub>を、板幅方向に長軸d<sub>c</sub>を持つ楕円に集光される。ここでスキャン方向と楕円ビームの長軸方向は一致しており、集光ビームはポリゴンミラー等で一定間隔P<sub>c</sub>でスキャン照射される。また圧延方向には一定間隔P<sub>l</sub>で照射される。ここでd<sub>c</sub>はP<sub>c</sub>より大きくなるように設定することで、連続するパルスレーザ光は鋼板上で重畳する。

【0010】この手法におけるレーザの各照射パラメータの関係式は式（1）、（2）に示される。ここでP<sub>p</sub>はパルスピークパワー、I<sub>p</sub>はピークパワー密度、E<sub>p</sub>はパルスエネルギー、U<sub>p</sub>はスキャン線上の任意の点での積算エネルギー密度である。Sはビーム面積、V<sub>c</sub>、F<sub>p</sub>はそれぞれC方向スキャン速度、パルスの繰り返し\*

$$(3) \quad I_p = \frac{P_{av}}{S}$$

$$(4) \quad U_p = I_p \cdot \tau = \frac{4 \cdot P_{av}}{\pi \cdot d_e \cdot V_c} \quad (\tau = d_c / V_c)$$

【0014】次に図2を用いてパルスレーザ、連続波レーザによる照射痕の発生、熱歪みの導入原理について整理し、本発明のかかわるレーザ磁区制御の作用を説明する。図2（a）にはレーザ波形をQスイッチYAGレーザ、QスイッチCO<sub>2</sub>レーザ、および連続波レーザのそれぞれの場合について示した。特公平5-32881号公報にも示されるように、QスイッチYAGレーザは特徴としてパルス時間幅が0.01μs程度と非常に短く、低パルスエネルギーにもかかわらずピークパワーは非常に高い。それに比べ同じQスイッチレーザでもCO<sub>2</sub>レーザの場合、パルス時間幅は200~500μsと長く、ピークパワーは比較的低い。また特徴として初期パルスに続き、低ピーク・高エネルギーのテール部分があり、テール時間長でエネルギーの調整も可能である。

【0015】図2（b）は図2（a）で説明した各種レーザ照射による鋼板表面の任意点における温度履歴の模式図である。レーザ照射による表面疵の発生は閾値温度T<sub>1</sub>によって特徴づけられる。また90°磁区を発生させる熱歪みは閾値温度T<sub>2</sub>で特徴づけられる。T<sub>1</sub>は表面絶縁皮膜の軟化・溶融温度に相当し、約800℃である。一方、熱歪みの解放温度から推測して、T<sub>2</sub>は約500℃である。従って、照射痕を抑制して、且つ熱歪みを導入するには鋼板温度を500℃以上、且つ800℃以下に制御すればよい。

【0016】次に温度履歴と歪みの導入効果について説明する。図2（b）中の温度上昇の傾きに相当する加熱速度は照射されるレーザの単位時間当たりのエネルギー

\*周波数である。nはパルスの重畳回数である。

【0011】

【数1】

$$(1) \quad I_p = \frac{P_p}{S}$$

$$(2) \quad U_p = \frac{E_p}{S} \cdot n = \frac{4 E_p}{\pi \cdot d_e \cdot P_c}$$

$$(n = d_c / P_c, S = \frac{\pi}{4} (d_e \cdot d_c))$$

【0012】一方、連続波レーザを用いた場合の照射パラメータは以下の（3）、（4）で表される。ここでP<sub>av</sub>は連続波レーザの平均出力、τはスキャン線上の任意点へのビーム照射時間である。

【0013】

【数2】

密度、すなわちパワー密度I<sub>p</sub>に比例する。熱歪みは鋼板の急加熱・急冷却によって導入されるため、高ピークパワーのレーザを用いることで歪み導入効率は高い。従って、連続波レーザに比べ、パルスQスイッチレーザの方が低照射エネルギーで磁性改善を行うことが可能である。一方、歪み総体積、および板厚方向への歪み浸透深さは照射された総エネルギー密度U<sub>p</sub>に比例し、図2（b）では温度履歴の時間積分値（図の斜線部面積）に比例する。

【0017】従って、本発明の係わる理想的なレーザ磁区制御は、鋼板温度が500~800℃の範囲で、パルスレーザ照射により急加熱・急冷却を繰り返し、且つ任意の点に照射される総エネルギー量U<sub>p</sub>をできるだけ効率的に導入することにある。以上の知見を基に、QスイッチCO<sub>2</sub>レーザを用いた本発明の磁気特性改善方法を詳細に説明する。本発明に用いるQスイッチCO<sub>2</sub>レーザはピーク出力がQスイッチYAGレーザより低く、連続波レーザのそれよりは高いパルスレーザ装置である。一般にはピーク出力は10~1000kWの範囲である。パルス時間幅は初期パルス時間幅が200~500ns、テールを含めた全長が1~10μsである。

【0018】パルスレーザビーム照射方法は図1で説明したように、l、c方向をそれぞれ独立に集光し、スキャン照射される。特にスキャン方向であるc方向と集光ビームの長軸は一致し、且つそのスキャン間隔P<sub>c</sub>は楕円の長軸長d<sub>c</sub>以下に設定し、パルスレーザビームが鋼板表面で重畳される。パルスピークパワー密度I<sub>p</sub>はビ

ークパワーとビーム集光面積を調整し、ビーム重畳条件下においても鋼板表面温度が皮膜損傷閾値 $T_1$ に達しないよう調整される。この様に $I_p$ を抑制するビーム照射条件下では、同時に単一パルス当たりの照射エネルギー密度も減少するため、一般的には効果的な歪み導入は不可能である。しかし本発明ではビーム重畳により鋼板上の任意の点には複数のパルスが照射される。各点に照射されるパルス数 $n$ はビーム長軸 $d_c$ と照射間隔 $p_c$ により前述の(2)式で与えられる。従って図2(b)に示すように、パルス繰り返し周波数 $F_p$ で $n$ 個のパルスによる間欠的な急加熱・急冷却が繰り返されるため、パルスレーザの利点である高い歪み導入能力は確保したまま、エネルギー的にはパルス重畳による積分効果で $U_p$ を増加させ、磁区細分化に必要な十分な歪みを与えることが可能である。

【0019】以上説明した作用により、本発明ではレーザ照射痕を抑制し、効率的な磁区制御効果が得られるという利点がある。次にQスイッチCO<sub>2</sub>レーザを用いる本発明を、QスイッチYAGレーザを用いる場合と比較する。図2(b)に示すようにQスイッチYAGレーザの場合、パルス時間幅が短く、且つピークパワーが高い。例えばフラッシュランプ励起のYAGレーザ媒質に、電気光学結晶を用いてQスイッチ発振を行う場合、一般的にパルス時間幅 $0.01\mu s$ 以下、パルスピークパワーは1MW以上となる。この様な短時間幅、高ピークパルスレーザ光では微妙な鋼板の加熱・温度制御は困難であり、容易に皮膜損傷が発生する。そこで本発明の照射法と同様にビーム径を拡大し、単一パルスあたりの $I_p$ を抑制することは可能である。しかし同時に単一パルスあたりのエネルギー密度も著しく低下し、且つパルス時間幅が短いため、パルスエネルギー積分効果を得るには、1MHz以上の非常に早いパルス繰り返し周波数での動作が必要であり、現実的には不可能である。従って、QスイッチYAGレーザでは照射痕の発生しない方向性電磁鋼板の特性改善は困難である。

【0020】また工業応用の観点からもQスイッチCO<sub>2</sub>レーザは大きな利点を持つ。電磁鋼板製造工程におけるレーザ処理速度を高速化するためには、パルスエネルギーとパルス繰り返し周波数の積である平均出力の大きなQスイッチレーザが望まれる。Qスイッチレーザの平均出力はベースとなる連続波レーザの平均出力に比例する。固体結晶であるYAGレーザの場合、平均出力として5kW程度が限界であり、一方、ガス媒質であるCO<sub>2</sub>レーザは大型化が比較的容易で、40kW以上の出力を持つ連続波レーザ装置も市販されている。またCO<sub>2</sub>レーザは装置・稼動コストが廉価である。よってQスイッチCO<sub>2</sub>レーザを使用することで、低コストで、高速・大型の電磁鋼板製造工程に磁性改善技術の適用が可能であるという利点を有する。

【0021】

【実施例】板厚0.23mmの高磁束密度方向性電磁鋼板の表面に本発明の方法によりQスイッチCO<sub>2</sub>レーザを照射し、照射痕の発生、磁気特性の改善効果を評価した。ここで1方向ビーム径 $d_l$ は約0.30mmに固定し、C方向ビーム径 $d_c$ は0.50~12.00mmで変更し、 $I_p$ を調整した。Qスイッチ発振のピーク出力 $P_p$ は20kW、パルスエネルギー $E_p$ は8.3mJ、パルス繰り返し周波数 $F_p$ は90kHzであり、平均出力は約750Wである。またスキャン速度 $V_c$ は43m/sであり、Qスイッチレーザ照射時のc方向照射ピッチ $P_c$ は約0.50mm、1方向ピッチ $P_l$ は6.5mmである。連続波レーザの場合、平均出力 $P_{av}$ は850Wであり、その他の照射条件はQスイッチレーザの場合と同じである。

【0022】図3は $I_p$ と表面のレーザ照射痕グレードの関係である。レーザ照射痕グレードは目視と耐錆試験による5段階評価であり、グレード4以上で錆は発生せず、グレード5では目視による痕跡も皆無である。図3より、Qスイッチレーザの照射痕発生閾値パワー密度は連続波レーザのそれに比べ1桁以上高い。これは図2

(b)で示すようにQスイッチレーザの場合、ピークパワーは高いものの、間欠的照射であるため、ピークパワーは高くても鋼板温度は損傷閾値 $T_1$ まで達しないためである。それに比べ、連続波レーザは瞬時的パワーは低いものの連続的な熱の蓄積が影響し、低パワーでも皮膜の熔融損傷が発生するものである。図3よりQスイッチCO<sub>2</sub>レーザの場合、皮膜損傷閾値パワー密度は12kW/mm<sup>2</sup>であり、 $I_p$ をこの値以下に調整することで照射痕を発生させないパルスレーザによる磁気特性改善が行えることが明らかである。

【0023】図4は図3で説明した照射条件の中で、特にレーザ照射痕が発生しなかったc方向ビーム径を選択し、鉄損改善率 $U_p$ をパラメータとして、連続波CO<sub>2</sub>レーザ法とQスイッチCO<sub>2</sub>レーザ法を比較した結果である。ここでC方向ビーム径はQスイッチレーザの場合8.7mm、連続波レーザでは約10.5mmである。これよりQスイッチCO<sub>2</sub>レーザを使用する本発明により、従来の連続波レーザ法に比べ、より低い照射エネルギー量で同等以上の鉄損改善率が得られることが明らかである。

【0024】ところで鉄損と並び電磁鋼板の重要な磁気特性である磁歪は、鋼板をトランスに使用したときの騒音に比例する要因であり、これは小さいほど望ましい。図5は磁歪と総照射エネルギー $U_p$ の関係をQスイッチCO<sub>2</sub>レーザと連続波CO<sub>2</sub>レーザで比較した結果である。この図に示されるように時歪は $U_p$ が大きいほど増加する。図4で説明したようにQスイッチCO<sub>2</sub>レーザで処理をする場合、より低い照射エネルギーで高い鉄損改善効果が得られるため、その結果、連続波レーザ処理材に比べ磁歪が低減されるという効果がある。

【0025】以上、本発明の基本骨子であるQスイッチCO<sub>2</sub>レーザの楕円ビーム重畳照射法の基本作用について実施例を示した。しかし、本発明においては鋼板の種類、楕円ビーム形状、照射ピッチ、照射パワー・エネルギー密度、パルス繰り返し周波数等を限定することで更に高い磁気特性改善効果を得ることが可能である。そこで次に照射条件限定による特性改善の一例を挙げる。

【0026】図6および図7は本発明の照射方法を用いて、楕円ビームの短軸、長軸を種々変更して、長軸長d<sub>l</sub>と鉄損改善率、および磁歪の関係をもとめたものである。ここでは被照射素材として板厚0.23mmの高磁束密度方向性電磁鋼板を用い、照射条件はP<sub>c</sub>=0.5m、P<sub>l</sub>=6.5mm、F<sub>p</sub>=90kHz、V<sub>s</sub>=43m/s、E<sub>p</sub>=8.3mJ、P<sub>p</sub>=20kWである。図6はd<sub>c</sub>を0.5~12.0mm、d<sub>l</sub>を0.20~0.40mmの範囲で変更した時の鉄損改善率をd<sub>l</sub>との関係でまとめた結果である。図6より、d<sub>l</sub>=0.25~0.35mmの範囲において、より高い鉄損改善率が得られることが明らかである。これは次のように説明される。(2)式より、P<sub>c</sub>が固定された条件ではd<sub>l</sub>を縮小することでU<sub>p</sub>が増加するため、歪みが効果的に導入される。従って、鉄損改善率は向上する。しかしd<sub>l</sub>が著しく縮小されると歪みのl方向長さも減少し、歪み体積は減少する。鉄損改善は歪みを起点とする磁区の細分化にあるため、歪み体積が著しく減少すると磁区細分化効果も減少することになる。その結果、図6のようにd<sub>l</sub>に関しては最適点が存在すると考えられる。

【0027】次に図7は同様にd<sub>l</sub>と磁歪の関係をもとめたものである。磁歪はd<sub>l</sub>の縮小で単調に減少する。磁歪の原因は外部磁界が180°磁区方向に沿って印加されたときに生ずる90°磁区の伸縮にあるが、特にl方向の伸縮の影響が大きい。従って、l方向の90°磁区幅、すなわち歪みのl方向幅が狭い方が磁歪は低い。従って図7で明らかなように照射ビームのl方向幅d<sub>l</sub>の縮小で磁歪が低減されるものである。図6および図7よりd<sub>l</sub>は0.25~0.35mmの範囲で鉄損、磁歪特性向上の両立が成される。

【0028】次に楕円ビームのC方向径d<sub>c</sub>についての最適値を示す。図8および図9は前述の照射条件に同じで、更にd<sub>l</sub>を0.28mmに固定した場合のd<sub>c</sub>と鉄損改善率、および磁歪の関係である。図8よりd<sub>c</sub>を拡大することで鉄損改善率は向上し、10mm以上では急激に劣化する。ここでd<sub>c</sub>が6mm以上でレーザ照射痕は発生しない。d<sub>c</sub>が1mm程度に小さい場合は(1)式で示されるようにピークパワー密度I<sub>p</sub>が高くなり、その結果、レーザ照射痕も発生するが、その際、皮膚の蒸発により鋼板表面でプラズマが発生する。プラズマはレーザ光の吸収媒質であるため鋼板へのレーザ入熱効率が減少する。しかし、d<sub>c</sub>が拡大されるとI<sub>p</sub>は低下し、プラズマ発生はほとんど観測されない。また(2)式よりU

pはd<sub>c</sub>に対して一定であるため、プラズマが抑制された分、より効果的に入熱が行われ、鉄損改善効果が上昇するものである。しかし、更にd<sub>c</sub>を拡大すると、単一パルスのエネルギー密度が著しく減少するため、パルスの重畳によっても十分な加熱・歪み導入が成されず、鉄損改善は劣化する。従って、レーザ照射痕の抑制、鉄損改善の観点でd<sub>c</sub>は6.0~10.0mmが最適である。

【0029】図9より磁歪はd<sub>c</sub>の拡大で単調に減少する。これもやはりプラズマの有無で説明される。レーザによる直接加熱を一次熱源とすると、鋼板の極近傍で発生するプラズマは二次熱源として働く。プラズマはレーザビーム径よりも鋼板面上での面積が大きいため、プラズマを熱源とした歪み幅は、レーザビームのl方向径より大きくなる。前述したように磁歪は歪みのl方向幅に比例するため、プラズマの存在で磁歪は増大する。一方、d<sub>c</sub>拡大でプラズマ影響は軽減されるが、d<sub>c</sub>=10mm以上の領域では図8に示した通り十分な歪みが導入されていないため、磁歪も低いと理解される。従って、d<sub>c</sub>の最適な範囲はやはり6.0~10.0mmと限定される。

【0030】これらの実施例より、本発明のレーザ照射法は、レーザビーム形状を最適化し、限定することでレーザ照射痕を発生させずに、より高い磁気特性を得ることができるという利点を有する。

#### 【0031】

【発明の効果】以上に説明したごとく本発明のQスイッチCO<sub>2</sub>レーザを用いた方向性電磁鋼板の鉄損改善法によれば、従来パルスレーザ法で問題であった表面のレーザ照射痕が発生せず、且つ連続波レーザ法で問題であった磁歪の劣化を抑制できるという利点を有する。またレーザ照射条件に合わせて集光ビーム形状を限定することで、より高い磁気特性を得ることが可能である。更に、YAGレーザに比べ高平均出力発振が可能で、設備・稼働コストが廉価なQスイッチCO<sub>2</sub>レーザを使用することから、高速・大規模の連続処理に対しても対応可能であり、且つ製造コストを低減できるという効果がある。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明のレーザ照射方法の実施例の説明図であり、(a)は全体を示す模式図、(b)は照射部の拡大図である。

【図2】(a)各種レーザの出力波形の説明図である。(b)各種レーザに本発明のレーザ照射方法を用いたときのスキャン線上の任意点の温度履歴の説明図である。

【図3】表面皮膚損傷グレードとレーザピークパワー密度の関係図である。

【図4】鉄損改善率と照射エネルギー密度の関係図である。

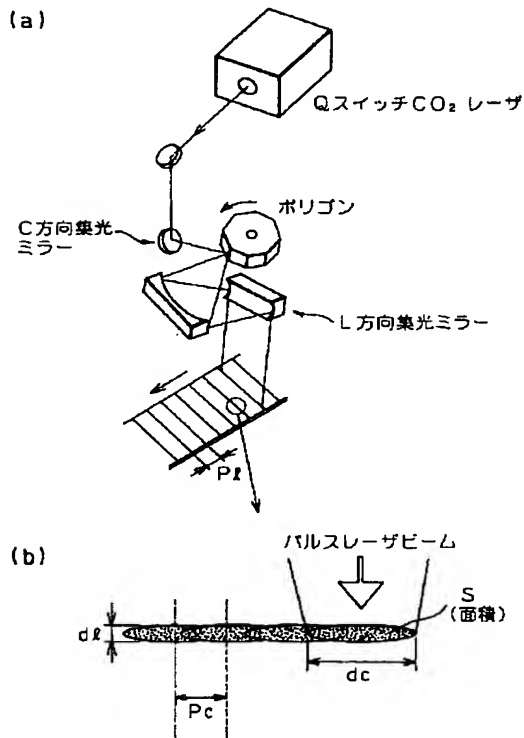
【図5】磁歪と照射エネルギー密度の関係図である。

【図6】鉄損改善率と楕円ビームのl方向ビーム径の関係図である。

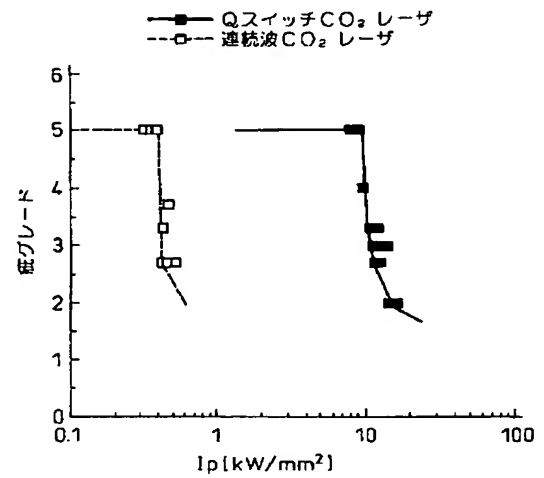
【図7】磁歪と楕円ビームのI方向ビーム径の関係図である。

【図8】鉄損改善率と楕円ビームのC方向ビーム径の関

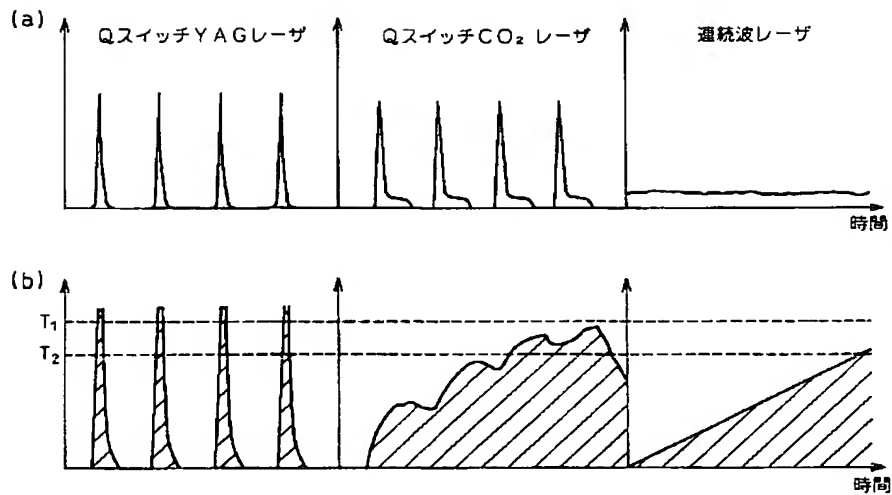
【図1】



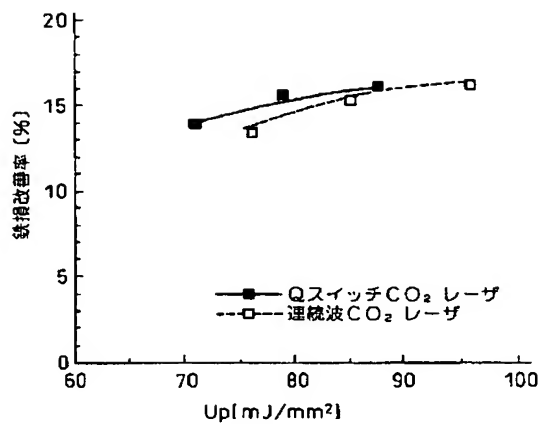
【図3】



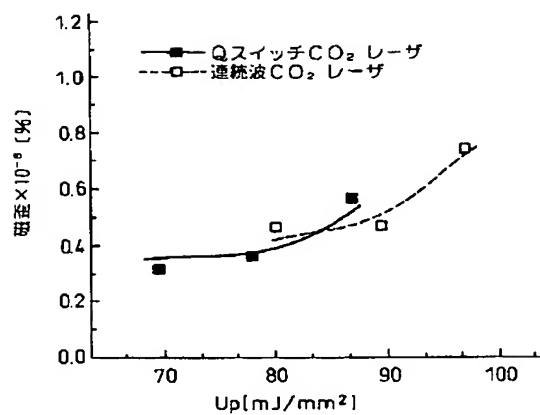
【図2】



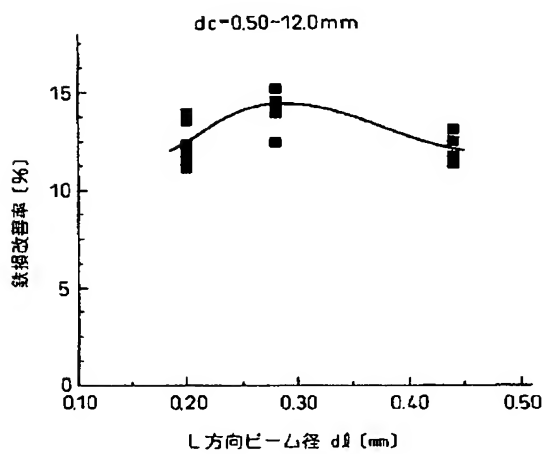
【図4】



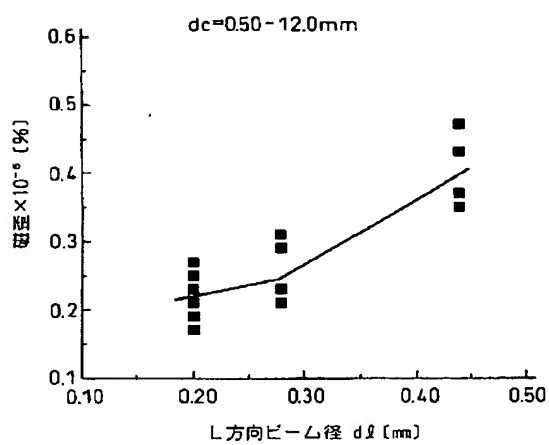
【図5】



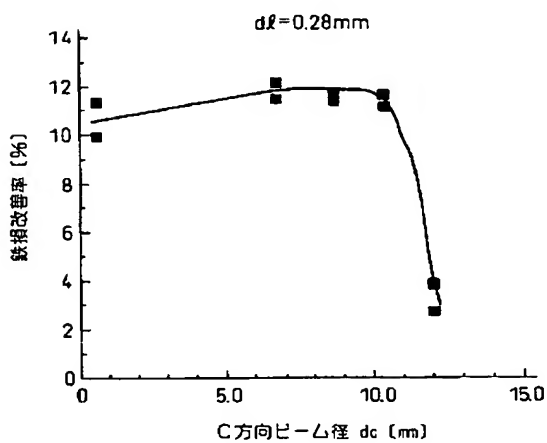
【図6】



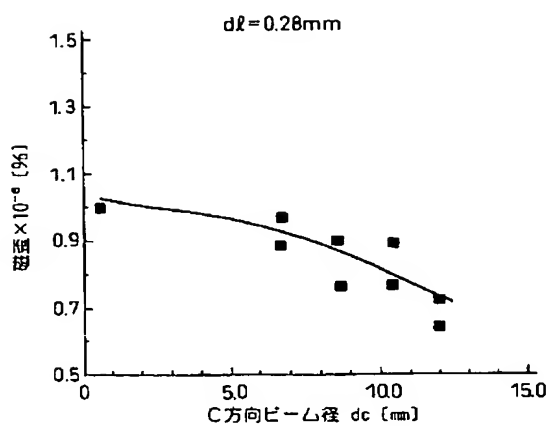
【図7】



【図8】



【図9】





フロントページの続き

(72)発明者 杉山 公彦  
福岡県北九州市戸畑区飛幡町 1 - 1 新日  
本製鐵株式会社八幡製鐵所内

(72)発明者 坂井田 晃  
福岡県北九州市戸畑区飛幡町 1 - 1 新日  
本製鐵株式会社八幡製鐵所内